

Cartographie de la vulnérabilité de la nappe à la pollution dans la plaine de Sidi Bel Abbès

Apport des données de télédétection et le SIG

N. Bentekhici & A. Saad
 Agence Spatiale Algérienne
 Centre des Techniques Spatiales
 Nadjla_b@yahoo.fr

ملخص : النمو الديموغرافي، كثافة المناطق الحضرية، تطور الأنشطة الصناعية وزيادة استغلال الأراضي الفلاحية ينتج عنه زيادة كبيرة في مكبات النفايات، تفرغ في مياه الصرف الصحي وتتنوع في الملوثات مما يؤدي إلى تأثيرات هامة على نوعية موارد المياه الجوفية (Albinet 1970).

أخذ نقص وتدهور المياه الجوفية طابع كارثي و شكّل واحد من أهم المشاكل البيئية التي يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار. يعتبر سهل سيدي بلعباس من أهم السهول الموجودة في الجزائر، وهو معرض لعدد من الملوثات الناتجة عن المواد الكيميائية والصرف الصحي و النفايات الصلبة والإستعمال العشوائي للأسمدة في الزراعة، مما يلزم علينا مراقبة تدهور الموارد المائية بهذا السهل.

تتطلب هذه المراقبة إنتاج خريطة التعرض لتلوث المياه الجوفية، اعتماداً على بيانات النموذج الرقمي للتضاريس ومعطيات خارجية مثل المعطيات الجيولوجية، المناخية، التربة و معطيات عن المياه الجوفية.

يعتبر هذا العمل، دراسة للمعايير الأساسية لتلوث المياه الجوفية ومساهمة نظام المعلومات الجغرافية (SIG) في تقييم التعرض لتلوث المياه الجوفية في سهل سيدي بلعباس.

الطريقة المستخدمة لتعيين التعرض لتلوث المياه الجوفية مأخوذة من طريقة DRASTIC المستخدمة عالمياً. هذا الغرض يستند على عوامل متعددة منها الشح، التربة (النوعية والإندار) و أيضاً على المناطق الغير مشبعة (الطبقات و السمك) لطبقة المياه الجوفية (Frances, 2002). يتطلب تطبيق هذه المنهجية المتبعة إنشاء نظام المعلومات الجغرافية مع استعمال برنامج ArcGis.

يجمع هذا النظام (SIG) من البيانات (نموذج رقمي للتضاريس الجيولوجية، الهيدروجيولوجية، الجيوفيزيائية، المناخية...)، و هو عبارة عن أداة حقيقية للمساعدة على اتخاذ القرارات من طرف مسيري الموارد المائية في منطقة سيدي بلعباس.

لكل عامل يتم تعيين معامل ووزن وفقاً لأهميته في النموذج المقترح. يتم حساب مؤشر الضعف بإضافة منتجات (المعامل X الوزن) للعوامل الخمسة DRSTI.

الكلمات الأساسية : التعرض للتلوث، المياه، نظم المعلومات الجغرافية، DRSTI، سهل سيدي بلعباس

Résumé : De la croissance démographique, de l'urbanisation intensive, du développement des activités industrielles et de l'exploitation accrue des terres cultivables résulte un fort accroissement des décharges, un rejet important des eaux usées et une grande diversification des polluants qui en atteignant les nappes peuvent avoir des effets nuisibles sur la qualité des ressources en eaux souterraines (Albinet 1970).

La raréfaction et la dégradation des ressources en eaux souterraines a pris une ampleur catastrophique et constitue une des dimensions environnementales les plus préoccupantes.

La plaine de Sidi Bel Abbès est très menacée par la pollution des eaux liée aux produits chimiques, aux rejets des eaux usées et déchets solides et à l'utilisation intensive des engrais.

Il est utile d'assurer le suivi de la qualité des ressources en eaux. Cette surveillance a besoin de la réalisation de la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe d'eau souterraine tout en se basant sur les données de modèle numérique de terrain (ASTER) et les données exogènes telles que : les données géologiques, climatiques, pédologiques et données sur les aquifères.

Ce travail prend en compte l'étude des principaux critères de pollution de la nappe ainsi que de l'apport du système d'information géographique (SIG) dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines dans la plaine de Sidi Bel Abbès.

La méthode utilisée pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine constitue une amélioration de la méthode DRASTIC, universellement utilisée. La vulnérabilité à la pollution est basée sur les paramètres relatifs à la recharge, au sol (pente et nature) et à la zone non saturée (faciès et épaisseur) de l'aquifère (Frances, 2002).

L'application de la méthodologie développée nécessite la mise en place d'un Système d'Information Géographiques, avec ArcGis.

Ce SIG, synthétisant une masse de données (modèle numérique de terrain, géologiques, hydrogéologiques,

géophysiques, climatiques etc.) considérable, constitue un véritable outil d'aide à la décision pour les gestionnaires des ressources en eau de la région de Sidi Bel Abbès.

Pour chaque paramètre critique, un coefficient et un poids ont été attribués d'après son importance dans le modèle proposé. L'indice de vulnérabilité est obtenu en additionnant les produits (coefficient \times poids) des 5 paramètres DRSTI.

Mots clés : vulnérabilité à la pollution, nappe, SIG, DRSTI, plaine Sidi Bel Abbès.

Abstract : population growth, intensive urbanization, the development of industrial activities and the increased exploitation of cultivable land results in a large increase in landfills, a significant discharge of sewage and diversification of pollutants reaching the wells can have detrimental effects on the quality of groundwater resources (Albinet 1970).

The depletion and degradation of groundwater resources has taken a catastrophic scale and constitutes one of the most worrying environmental dimensions.

The plain of Sidi Bel Abbès is threatened by water pollution due to chemicals, to discharges of waste water and solid waste and the intensive use of fertilizers.

It is useful to monitor the quality of water resources. This surveillance requires the realization of the vulnerability map to pollution of groundwater while relying on digital terrain model data (ASTER) and exogenous data such as geological, climatic, data on soil and aquifers.

This work considers the study of the main criteria for groundwater pollution as well as the contribution of geographic information system (GIS) in assessing vulnerability to groundwater pollution in the plains of Sidi Bel Abbès.

The method used to map the vulnerability to pollution of ground water is an improvement of the DRASTIC method universally used. Vulnerability to pollution is based on the parameters for charging, floor (slope and kind) and the unsaturated zone (facies and thickness) of the aquifer (Frances, 2002).

The application of the developed methodology requires the establishment of a Geographic Information System with ArcGIS.

This GIS, synthesizing a mass of data (digital terrain model, geological, hydrogeological and geophysical, climate etc.) considerable, is a real tool to aid decision for water resource managers in the region of Sidi Bel Abbès.

For each critical parameter, a coefficient and a weight were assigned according to its importance in the proposed model. The vulnerability index is calculated by adding the products (\times weight factor) of 5 DRSTI parameters.

Key words : vulnerability to pollution, water, GIS, DRSTI, Sidi Bel Abbès plain.

1. Introduction

Dans la plaine de Sidi Bel Abbès, le risque de pollution est une combinaison de plusieurs facteurs naturels (hydrogéologiques) et anthropiques. Les nappes alluviales dans cette région représentent une source d'eau importante et doivent, à ce titre, être protégées contre toute éventuelle source de pollution (Hallouche, 2010). La cartographie de la vulnérabilité des nappes est un outil de base pour la protection des ressources en eaux.

À cet effet, l'estimation de la vulnérabilité permet de préciser les zones les plus sensibles aux activités anthropiques. Une fois identifiées, ces zones peuvent être gérées avec précaution par les planificateurs et les utilisateurs de la terre.

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses, dans ce travail, nous avons utilisé une approche basée sur la méthode DRASTIC standard (Aller et al. 1987).

La méthodologie utilisée ici a la particularité de distinguer la vulnérabilité verticale d'une nappe vis-à-vis d'une pollution provenant de la surface du sol (basée uniquement sur les paramètres relatifs à la recharge, au sol et à la zone non saturée), cette méthode a été appliquée à la nappe alluviale de Sidi Bel Abbès. Ce travail n'aurait pas pu être effectué sans l'utilisation d'un Système d'Informations Géographiques (SIG) en utilisant l'environnement ArcGIS et les données de télédétection en utilisant un modèle numérique de terrain Aster.

2. Zone d'étude

La zone d'étude est la plaine de Sidi Bel Abbès fait partie du bassin versant d'oued El Mekkara située dans l'extrême Nord-Ouest d'Algérie. Le climat y est semi-aride, avec une température moyenne de 16°C et une pluviométrie annuelle n'excédant pas les 340 mm.

Elle est très menacée par les effets de la pollution des eaux provenant des déchets solides et liquides. Elle fait partie de l'ensemble des hautes plaines de l'Oranais par opposition aux basses plaines côtières. Elle est bordée au Nord par la chaîne du Tessala et au Sud par l'ensemble montagneux d'Oued Mimoun, Sidi Ali Ben Youb formant la bordure septentrionale des hauts plateaux, limitée à l'Ouest par la vallée de l'oued Isser (Fig. 1a). Pour la réalisation de la carte de vulnérabilité à la pollution, nous avons choisie une zone de la plaine selon la disponibilité des données piézométriques, cette zone est limitée à partir des points des puits existants (Fig.1b).

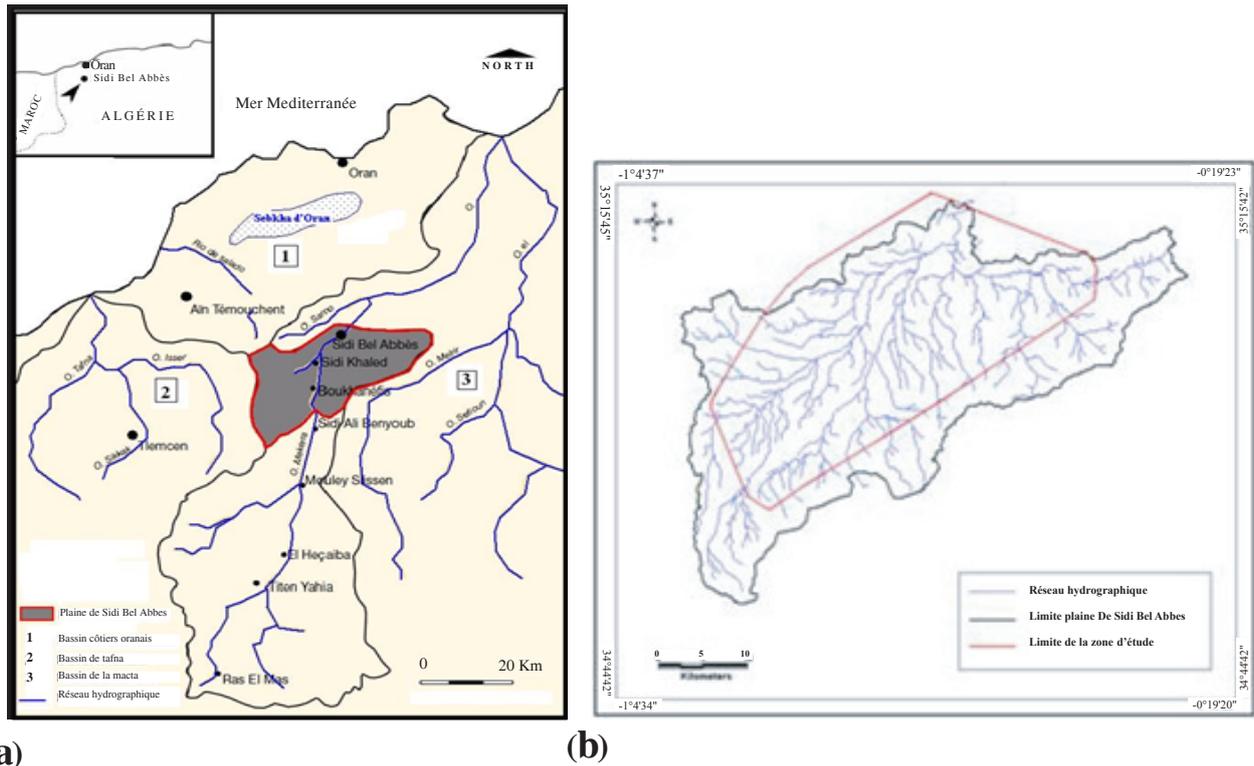


Fig. 1 (a) Localisation géographique de la plaine de Sidi Bel Abbès (d'après la notice explicative de la carte hydrogéologique de la plaine de Sidi Bel Abbès, modifiée), (b) Localisation de la zone d'étude

3. Méthodologie de travail

Le terme vulnérabilité des aquifères peut donner lieu à deux interprétations :

- La vulnérabilité intrinsèque, fondée sur les conditions physiques naturelles du milieu ;
- La vulnérabilité spécifique, qui fait intervenir non seulement les paramètres naturels, mais également les propriétés du contaminant (sa nature, sa mise en place, etc.) et la nature des activités anthropiques (Civita. 1994).

Pour la réalisation de ce travail, on s'intéresse à l'étude de la vulnérabilité intrinsèque, qui se définit comme une propriété essentielle des systèmes aquifères qui dépend de la sensibilité des systèmes aux impacts humains et/ou naturels.

Nous avons utilisé une méthode de système de classes pondérées ou méthode à pondération et à poids (Point Count System Model [PCSM] (Mohamed. 2001), cette méthode est basée sur l'affectation de notes aux paramètres qui sont jugés nécessaires pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines en définissant des intervalles. Par la suite une pondération est attribuée pour chaque paramètre selon son importance dans l'évaluation de la vulnérabilité (Zerouali. 1994).

Le matériel utilisé pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité à la pollution est constitué de :

- Données des modèles numériques de terrains ;
- Données cartographiques (topographique, géotechnique) ;

- Données piézométriques ;
- Données climatiques.

Le traitement de toutes ces données s'est effectué avec les logiciels ArcGis.

La méthode DRASTIC détermine le degré de protection d'un aquifère. C'est une méthode standardisée d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines indépendamment du type de polluant.

Elle prend en compte la majeure partie des facteurs hydrogéologiques qui affectent et contrôlent l'écoulement des eaux souterraines (Dibi. 2007).

La méthode DRASTIC est basée sur sept paramètres de vulnérabilité qui sont :

- Profondeur de l'eau (**D**) ;
- Recharge efficace (**R**) ;
- Matériaux de l'aquifère (**A**) ;
- Type de sol (**S**) ;
- Topographie ou la pente (**T**) ;
- Impact de la zone vadose ou zone aérée (**I**) ;
- Conductivité hydraulique de l'aquifère (**C**).

L'évaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC s'effectue par le calcul de l'Indice DRASTIC (ID) selon l'équation (1).

$$ID = Dc \times Db + Rc \times Rb + Ac \times Ab + Sc \times Sb + Tc \times Tb + Ic \times Ib + Cc \times Cb \quad (1)$$

- *D,R,A,S,T,I,C* : représentent les paramètres DRASTIC définis précédemment ;
- *c* et *b* : représentent respectivement le poids et la note attribués à chaque paramètre DRASTIC.

L'indice ainsi calculé représente une mesure du niveau de risque de contamination de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache. Ce risque augmente avec la valeur de l'indice.

Pour la réalisation de la carte de vulnérabilité de la nappe à la pollution dans la plaine de Sidi Bel Abbas nous avons utilisée les 5 paramètres suivants :

- Profondeur de l'eau (**D**) ;
- Recharge efficace (**R**) ;
- Type de sol (**S**) ;
- Topographie ou la pente (**T**) ;
- Impact de la zone vadose ou zone aérée (**I**).

4. Spatialisation des paramètres (DRSTI)

Dans le domaine de SIG, les données spatiales peuvent être représentées soit en mode raster (image) ou en mode vecteur (objet). Dans ce travail, nous avons utilisé une représentation de données en mode vecteur et raster (Evans 1990). Les cartes sont obtenues soit par le traitement des données spatiales, soit par digitalisation des cartes

existantes ou soit par interpolation de données ponctuelles. L'interpolation est la procédure qui permet d'estimer la valeur d'une variable dans un endroit déterminé, à partir d'un certain nombre de points de mesure, pour la calculer en chaque point de la zone étudiée.

4.1 Profondeur de la nappe (paramètre D)

La profondeur de la nappe représente la distance verticale traversée par un contaminant à la surface du sol pour atteindre la nappe. Généralement, la protection potentielle de l'aquifère augmente avec la profondeur de la nappe (Smida et al, 2010).

La profondeur de la nappe a été établie à partir des relevés niveau statique relatifs aux puits de surface et aux piézomètres implantés dans la région (Tableau 1a), par la méthode d'interpolation Inverse Distance Weighting (IDW) sur 140 puits, afin de transformer ces courbes en un modèle numérique de profondeur de la nappe.

La variabilité spatiale de la profondeur de la nappe est représentée selon 6 classes (tableau 1b) allant de 2 à 50 mètres. La majeure partie de la nappe est située entre 9 et 15 mètres de profondeur.

Tab 1. (a) Données des puits dans la plaine de Sidi Bel Abbas (ANRH 2010),
(b) Cote attribuées à la profondeur de la nappe (Aller et al, 1987).

N° de puit	X	Y	Z	Profondeur	Piezometre
1	184300	205100	540.77	7.62	533.17
2	194250	217850	480.7	10.21	470.49
3	194300	214400	485.41	10.17	475.24
4	191700	212900	507.2	33.13	474.07
5	193750	213750	490.2	19.83	470.37
6	193000	135000	490	9.35	480.47
7	189450	216050	522.72	19.79	502.93
8	180650	207750	585	3.13	581.87
9	180400	202500	588	13.65	574.44
10	208580	210950	534	22.1	511.9
11	188750	207700	527	25.34	501.66
12	198050	213600	477.22	6.71	470.51
13	190250	209300	518.3	29.84	488.46
14	188800	202850	515	15.79	499.21
15	194400	210700	503	27.37	475.36
16	196500	221200	460.88	6.32	454.56
17	180500	211750	575	5	570
18	185800	206000	540	11.16	528.84

(a)

Intervalles de profondeur	% de la surface	Cote
0 -1.5	0	10
1.5 – 4.5	3.14	9
4.5 – 9	14.6	7
9 – 15	22.23	5
15 – 22	24.55	3
22 – 30	29.1	2
+ 30	6.3	1

(b)

La carte de la profondeur de la nappe en Fig. 2 présente l'un des paramètres les plus importants au niveau de l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution. Elle donne une idée de la distance que doit parcourir le polluant avant d'atteindre la nappe. Elle joue un grand rôle car le risque de la pollution est important lorsque le niveau d'eau dans les nappes augmente.

Les zones de la nappes de faible profondeur entre 1.5 à 4.5 m présentent 3.14 % de la surface totale de la zone d'étude, ainsi que les profondeurs entre 4.5 à 9 m présentent 14.6 % (tableau 1b), dans ces zones la contamination des eaux est très forte elle diminuée avec la profondeur de la nappe.

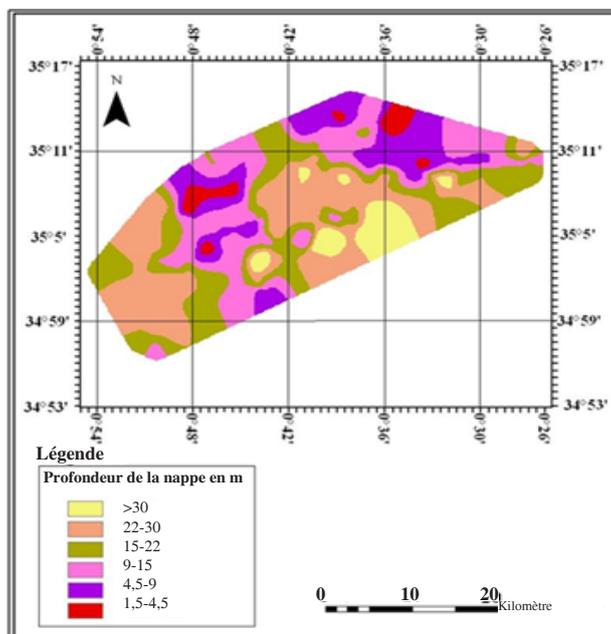


Fig. 2 Carte des classes de la profondeur dans la zone d'étude.

4.2 Précipitation et recharge nette (paramètre R)

La recharge nette annuelle est la quantité d'eau atteignant la zone saturée sur une période donnée, elle constitue le transfert des polluants vers les eaux souterraines.

Pour calculer la recharge nette nous avons utilisé la méthode

des équations (Williams et Kissel 1991) qui dépend de la nature des formations géologiques.

Dans ce cas nous avons utilisé les données pluviométriques moyennes annuelles de 12 stations météorologiques (Tableau 2).

Tab 2. Précipitations et recharges nettes moyennes annuelles des stations météorologiques (ONM 2010 modifié).

Stations météorologiques	Période observation	Précipitation moyenne annuelle (mm/an)	Recharge (mm/an)
Sidi Bel Abbas	1975 - 2009	276	215.45
Tenira	1975 - 2009	336	274.17
Ain Trid	1964 - 2009	395	332.26
Tessala	1964 - 2009	309	247.6
Lamtar	1975 - 2009	302	240.8
Ben Badis	1979 - 2004	318.1	269.58
Sidi Ali Ben Youb	1976 - 2004	240	192.72
Mostafa Ben Brahim	1974 - 2004	266.7	218.9
Sfisef	1974 - 2004	390.09	340.8
El Haçaiba	1981 - 2004	242.8	192.46
Oued Mimoun	1976 - 2005	318.5	296.9
Nakhala	1976 - 2005	333.2	284.5

Ces stations sont localisées dans les zones de groupe hydrologique B et C.

Le calcul est :

$R = (P - 10.28)^2 / (P + 15.43)$ pour les zones ayant des sols appartenant au groupe hydrologique (A) : sols métamorphiques- basaltes – quartz – schistes.

$R = (P - 15.05)^2 / (P + 22.57)$ pour les zones ayant des sols appartenant au groupe hydrologique (B) : sols sableux - sols gréseux - sols sableux limoneux.

$R = (P - 19.53)^2 / (P + 29.29)$ pour les zones ayant des sols appartenant au groupe hydrologique (C) : limoneux sableux – sablo limoneux – argileux sableux – encroustement nodulaires.

$R = (P - 22.67)^2 / (P + 34.00)$ pour les zones ayant des sols appartenant au groupe hydrologique (D) : sols hydro morphe argileux – sols de périmètre urbain.

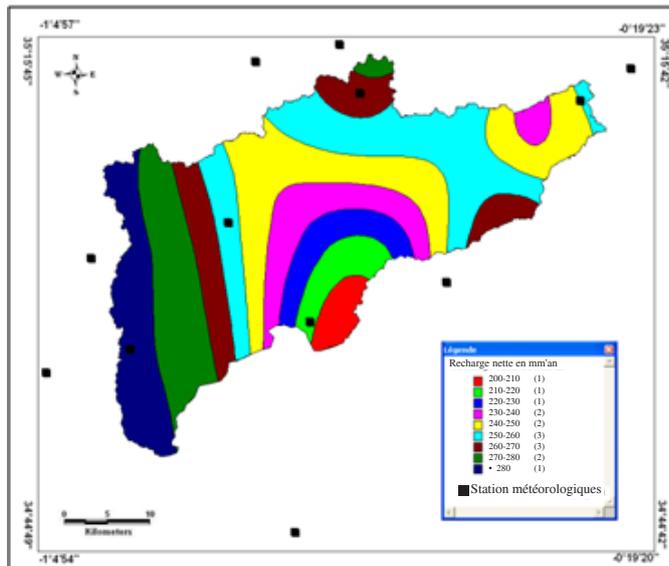
R : Recharge annuelle nette en mm/an.

P : pluviométrie annuelle moyenne en mm/an.

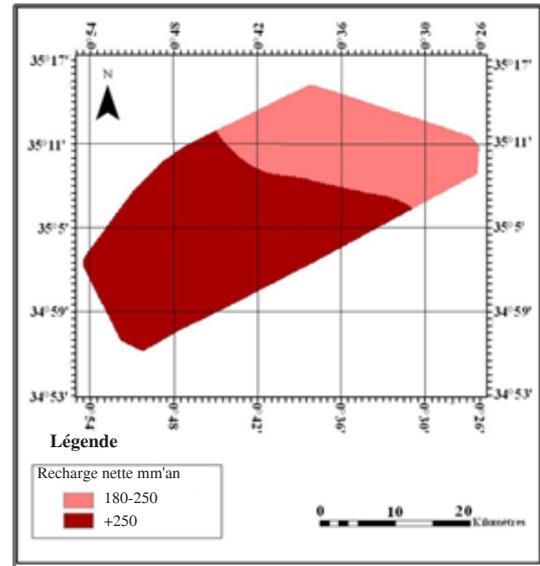
Nous avons utilisé la méthode d'interpolation Inverse Distance Weighting sur les 12 stations sous ArcGis pour transformer ces courbes en un MNT de recharge nette (Fig. 3a). La variabilité spatiale de la recharge est représentée en 2 classes. Selon le modèle DRASTIC les cotations de ce paramètre varient entre 8 et 9 (Tableau 3).

Tab 3. Cote attribuées au paramètre recharge (Aller et al ; 1987).

Intervalles recharge (mm)	Cote
0 - 50	1
50 – 100	3
100 – 180	6
180 – 250	8
+ 250	9



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Carte de la recharge nette dans la plaine de Sidi Bel Abbas, (b) Carte des classes de la recharge nette dans la zone d'étude.

La recharge nette calculée sur l'ensemble de la zone d'étude est comprise entre 180 à 285 mm/an, plus la recharge est importante, plus le potentiel de contamination des eaux souterraines est important et plus la cote qui lui est attribuée est importante, une cote de 8 et 9 (Fig.3 b).

4.3 Type de sol (paramètre S)

Les caractéristiques du sol contrôlent les mouvements descendants des contaminants. En effet, la présence de

matériaux fins (argiles, silts et limons) et de la matière organique dans le sol diminue la perméabilité intrinsèque, et retarde la migration des contaminants, par les processus physico-chimiques adsorption, échange ionique, oxydation, biodégradation, en effet, plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande (Smida et al, 2010).

Ce paramètre est extrait de la carte pédologique de la plaine de Sidi Bel Abbas réalisée par Faraoun et Benabdeli (2010).

La figure 4 montre la répartition spatiale des sols dans la région d'étude. Les types de sol sont pondérés de 1 à 10.

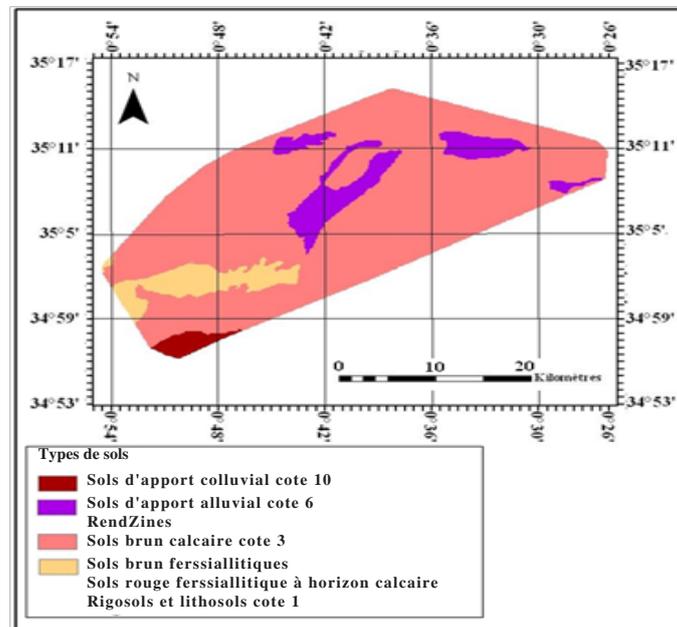


Fig. 4 Carte pédologique de la zone d'étude (Carte pédologique de Faraoun 2010 Modifiée).

4.4 Paramètre topographie (pente)

Le paramètre topographie est représenté dans la méthode DRASTIC par les valeurs de la pente en degré, ce paramètre traduit l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des eaux superficielles vers la nappe et reflète donc la capacité de ces eaux à introduire des agents polluants vers la nappe. En effet, plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible (Hamza et al, 2007).

Le modèle numérique de terrain ASTER d'une résolution de 30 m prise en 2002 (Fig.5 a) a été utilisé pour calculer la pente de la zone d'étude.

La quasi-totalité de la région (à l'exception des reliefs) est caractérisée par une faible pente comprise entre 1° à 3.5° soit 57.11% de la surface totale de la zone d'étude (Tableau 4). Ce paramètre est pondéré de 1 à 10 (Fig.5 b).

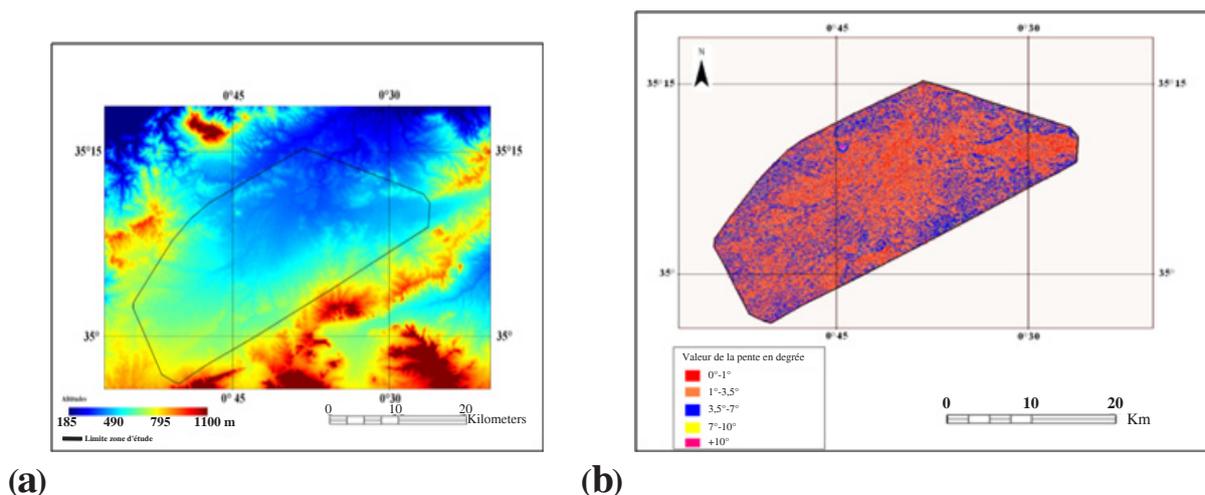


Fig. 5 (a) Modèle numérique de terrains de la zone d'étude, (b) Carte des classes de la pente dans la zone d'étude.

Tab 4. Cotation des valeurs de pentes et leurs superficies dans la zone d'étude.

Valeurs des pentes	Superficie ha	% de la superficie	Cote
0° - 1°	10912.2	13.93	10
1° - 3.5°	44736.6	57.11	9
3.5° - 7°	19772.04	25.24	5
7° - 10°	2103.5	2.68	3
+ 10°	808.6	1.03	1

4.5 Lithologie de la zone non saturée

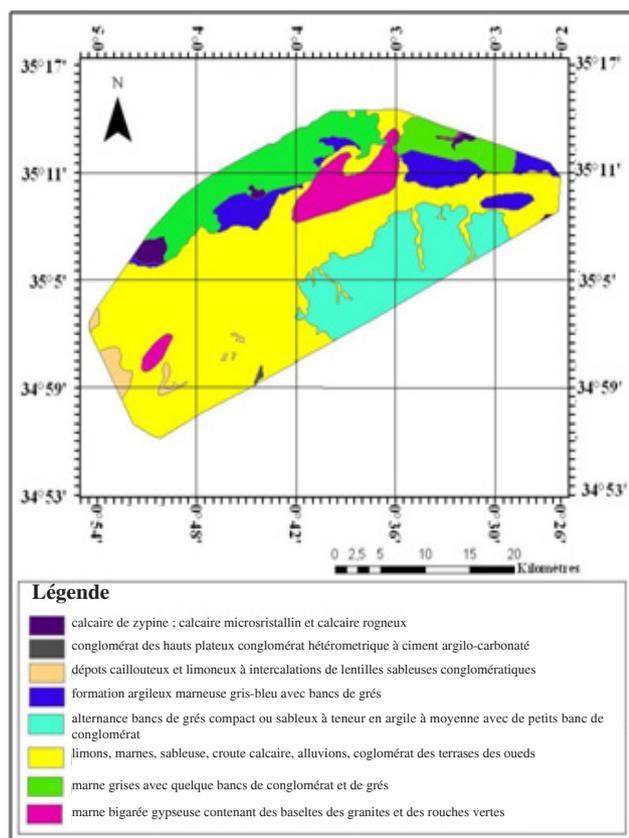
La zone non saturée est définie comme la fraction entre la nappe et la surface du sol où les pores sont partiellement saturés en eau. La perméabilité de cette zone non saturée contrôle la circulation des polluants et leur arrivée à la nappe. La plupart des processus physicochimiques qui ont lieu dans cette zone sont influencés par son épaisseur. L'infiltration et la dispersion des contaminants sont guidées par les caractéristiques lithologiques des couches qui contrôlent leurs chemins

et leurs trajectoires en sub-surface (Smida et al. 2010) Tableau 5.

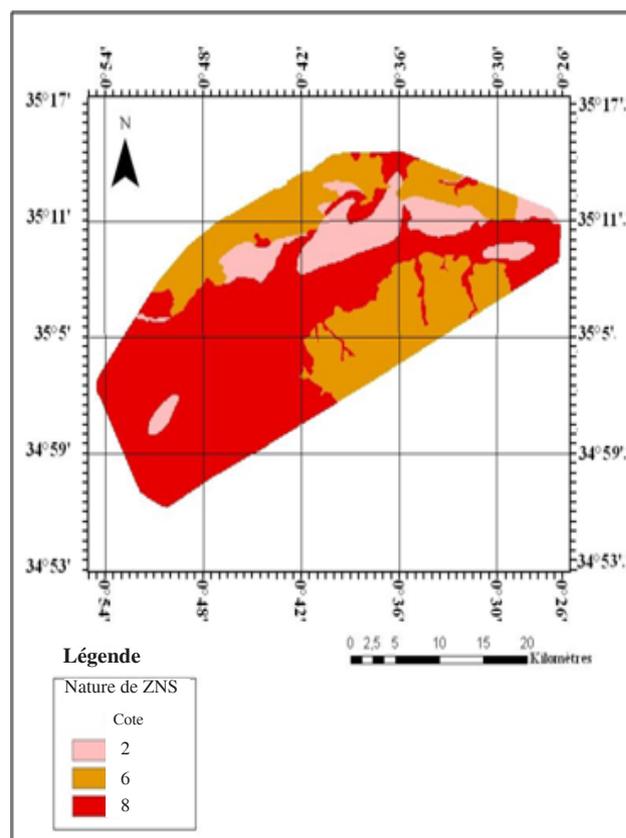
Ce paramètre a été obtenu à partir de la digitalisation des cartes géologiques à échelle 1/50.000.

Ce type d'information permet d'avoir une carte de synthèse représentant la lithologie de la zone non saturée (Fig.6 a).

Nous avons classé les couches lithologiques selon leurs degrés d'infiltration. Les différentes classes obtenues sont pondérées de 2 à 8 (Fig.6 b).



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Carte lithologique de la zone d'étude (Cartes géologiques modifiées), (b) Carte du paramètre (I), nature de la zone non saturée de la zone d'étude.

Tab 5. Formations géologiques et leurs degrés d'infiltration
(Données de la carte hydrogéologique à 1/100.000).

Formations géologiques	Degré d'infiltration	Cote
Calcaire de zygine : calcaire microcristallin et calcaire rognoneux.	Moyen	6
Conglomérat des hauts plateaux conglomérat hétérométrique à ciment argilo-carbonaté.	Moyen	6
Dépôts caillouteux et limoneux à intercalations de lentilles sableuses ou conglomératiques.	Fort	8
Formation argilo-marneuse gris –bleu avec bancs de grés.	Faible	2
Alternance de bancs de grés compacts ou sableux à teneur en argile faible à moyenne avec de petits bancs de conglomérat.	Moyen	6
Limons, marnes, argiles, sableuses, croute calcaire alluvions conglomérats des terrasses des oueds.	Fort	8
Marnes grises avec quelques bancs de conglomérat et de grés.	Moyen	6
Marnes bigarrées gypseuses avec des basaltes des granites et des roches vertes.	Faible	2

5. Réalisation de la carte de vulnérabilité de la nappe à la pollution

La méthodologie utilisée pour calculer la vulnérabilité de la nappe à la pollution s'est basée sur les seuls paramètres relatifs à la recharge, au sol (pente, pédologie et nature lithologique) et la profondeur de la nappe. Les mêmes poids, cotes et classes que celles définis par la méthode DRASTIC, ont été attribués, dans cette méthode, aux paramètres utilisés (Tableau 6). L'indice de vulnérabilité vertical **Iv** est calculé en faisant la

somme des produits cote et poids de chaque paramètre pris en compte :

$$Iv = (Dr \times Dw) + (Rr \times Rw) + (Sr \times Sw) + (Tr \times Tw) + (Ir \times Iw)$$

a) **D,R,S,T,I** : représentent respectivement les paramètres pris en compte.

b) **r** et **w** : représentent respectivement le poids, motionnés en tableau n°6, et la cote attribués à chaque paramètre pris en compte.

Tab 6. Poids des paramètres DRSTI.

Paramètres	Poids
D : Profondeur de la nappe	5
R : Recharge efficace	4
S : Type de sol	2
T : Pente du terrain	1
I : Impact de la zone non saturée	5

L'utilisation du SIG a permis d'obtenir des cartes exprimant la variabilité spatiale de chacun des paramètres, et par conséquent celle de l'indice de vulnérabilité qui leur est associé.

À partir de l'outil «RASTER Mathématique» sous ArcGis, nous avons appliqué l'équation de **Iv** afin d'obtenir la carte

de synthèse sur les degrés de vulnérabilité de la nappe à la pollution classée en quatre classes (faible, moyen, fort et très fort).

L'indice calculé prend une valeur maximale de 130 (100 %) et une valeur minimale de 53 (0 %) (Fig. 7).

Tab 7. Superficies et pourcentages des degrés de vulnérabilité à la pollution.

Degré de vulnérabilité	Superficie ha	Pourcentage %
Vulnérabilité faible	4020	5.13
Vulnérabilité moyenne	24080	30.7
Vulnérabilité forte	42869.9	54.7
Vulnérabilité très forte	7363	9.3

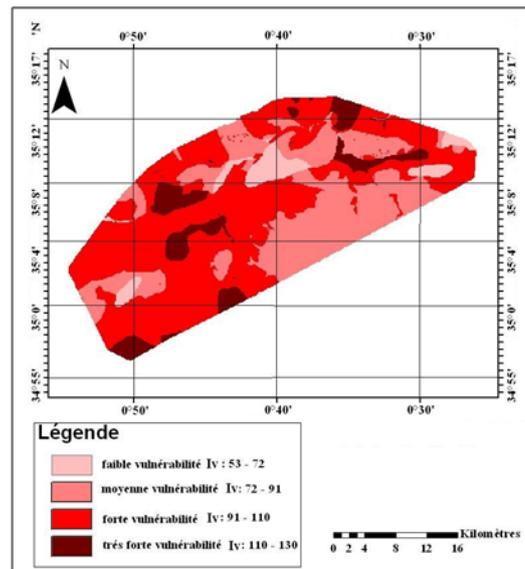


Fig. 7 Carte de vulnérabilité des eaux souterraine à la pollution dans la zone d'étude.

L'analyse de la carte de vulnérabilité et selon le tableau 7 nous pouvons distinguer deux zones de forte et de très forte vulnérabilité, couvrant une bonne partie de la plaine soit 64 % de la surface totale de la zone d'étude.

- **Zone de faible vulnérabilité :** occupe 5.13% de la zone d'étude au Sud de la ville de Sidi Bel Abbès, domaine de Si Abd El Krim et Douar El Kelalda, expliqué par la faible infiltration des couches lithologique (formation argilo-marneuses) et profondeur élevée de la nappe, donc le contaminant met de temps pour atteindre la surface piézométrique.
- **Zone de moyenne vulnérabilité :** occupe 30.7% de la surface, au Sud de la zone d'étude (forêt de Telmouni, forêt Hassi Dahou et domaine de Sahridj et Kribia) au niveau de douar El Kdadra et à l'Ouest de la ville de Sidi Bel Abbès (Bled Sbaa). Cette vulnérabilité due à la moyenne infiltration associée à la moyenne pente et une moyenne profondeur de la nappe.
- **Zone de forte vulnérabilité :** La nature lithologique est constituée par du sable et des alluvions, la faible pente et la faible profondeur de la nappe sont les causes de cette forte vulnérabilité. Elle couvre plus de la moitié de la zone d'étude soit 54.7%, localisée au niveau de douar Caid Bel Arbi, domaine Kadda, ville de Sidi Bel Abbès où se trouve la décharge publique, le domaine Takouka et les villes de Sidi Khaled, Lamtar et Tabia.
- **Zone de très forte vulnérabilité :** correspond essentiellement à la ville de Sidi Yacoub et domaine de Ben Saadoun (centre de la zone d'étude) où la pente est très faible favorisant l'infiltration par rapport au ruissellement, la forte infiltration des couches lithologique et la très faible profondeur de la nappe entre 2 et 4m, ces paramètres définissent une vulnérabilité très élevée, elle occupe 9.3% de la surface totale.

6. Conclusion

L'indice DRSTI calculé varie entre 53 et 130. Cet écart de variation permet de classer la vulnérabilité en quatre classes : faible, moyenne, forte et très forte.

La répartition spatiale montre que 5.13% de la région d'étude présente une vulnérabilité faible, 30.7% vulnérabilité moyenne, 54.7% une vulnérabilité forte et 9.3% une vulnérabilité très forte. Ce qui nous permet de dire que la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbès est très menacée par l'infiltration des polluants à partir de la surface du sol.

Douar Caid Bel Arbi, domaine Kadda, ville de Sidi Bel Abbès, le domaine Takouka et les villes de Sidi Khaled, Lamtar, Tabia et Sidi Yacoub sont des zones à forte vulnérabilité.

Le risque est important vu la présence de plusieurs sources de pollution dans la région à savoir la décharge publique de Sidi Bel Abbès dans une zone à forte vulnérabilité.

Malgré les difficultés soulevées dans l'élaboration des cartes de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRSTI, elle permet toujours de se faire une idée assez précise sur les zones vulnérables dans la zone d'étude en vue de prendre des dispositions de protection nécessaires.

Ce travail a montré également l'apport capital fourni par les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et les données de télédétection pour la réalisation des cartes de vulnérabilité. Le SIG élaboré constitue également un outil performant et efficace d'aide à la décision pour les gestionnaires des ressources en eau. Nous recommandons la généralisation des cartes de vulnérabilité à l'ensemble des nappes importantes de l'Algérie.

Références bibliographiques

- M. Albinet, J. Margat, 1970 : Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Bulletin BRGM, 2^e Série 1970 ; 3 pp 13 -22.

- L. Aller, J. Lehr, H. Petty, T. Bennett, 1987: DRASTIC : A standardized system to evaluate Groundwater Pollution using Hydrogeologic setting. *Jour. Geol. Soc. India*, 29(1), pp. 23-37.
- M. Civita, 1994: Contamination vulnerability mapping of the aquifer: theory and practice. *Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale*, Pitagora, Italy.
- B. Dibi, D. Inza, K. Koffi, N. Soro, K. J. Kouame, I. Savane, 2007: Evaluation et Cartographie de la Vulnérabilité à la Pollution en Aquifère Confiné Selon La Méthode DRASTIC: Cas de La Région d'Aboisso, Sud-Est de La Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, Volume 18, N° 3, pp 500-513.
- B. M. Evans, W. L. Myers, 1990: A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC. *Journal of Soil and Water Conservation* n° 29 pp 242-245.
- F. Faraoun, K. Benabdeli, 2010: Cartographie et caractérisation physico-chimique des sols de la plaine de Sidi Bel Abbés (Algérie occidentale). *Afrique SCIENCE* 06 (3) pp 18-26.
- A. Frances, E. Paralta, J. Fernandes, L. Ribeiro, 2002 : Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agricultural pollution: the susceptibility index, FGR'01, Third Int. Conf. on Future Groundwater Resources at Risk CVRM publ., Lisbon, pp 35-44.
- B. Hallouche, M. Benyahia, K. Moueddene, A. Marok, 2010 : Apport de l'hydro géomorphologie dans la cartographie des zones inondables Exemple de la plaine de Sidi Bel Abbés (Algérie Nord occidentale). *Sécheresse* vol. 21, n° 3, juillet-août-septembre 2010.
- M. Hamza, A. Hafedh, A. France's, R. Rodriguez, 2007 : Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline–Ras Jebel–Raf Raf. *C. R. Geoscience* 339 pp 493-505.
- RM. Mohamed, 2001 : Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC. *Sciences et changement planétaires. Sécheresse*, 12(2) pp 95-101.
- H. Smida, C. Abdellaoui, M. Zairi, H. Ben Dhia, 2010 : Cartographie des zones vulnérables à la pollution agricole par la méthode DRASTIC couplée à un Système d'information géographique (SIG) : cas de la nappe phréatique de Chaffar (sud de Sfax, Tunisie). *Science et changements planétaires / Sécheresse* volume 21, numéro 2, avril mai et juin 2010.
- J. R. Williams, D.B. Kissel, 1991: Water IPer-colation: an indicator of nitrogen-leaching potential. Chapter 4. In: R. F. Follett, D. R. Keeney, and R. M. Cruse (eds.). *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability*. SoilSci. Soc. Am., Madison, WI. pp.59-83.
- A. Zerouali, 1994 : Elaboration de la vulnérabilité moyen nant la méthode DRASTIC et le Système d'Information Géographique (SIG) (cas de la nappe de Souss-Chtouka), *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. Volume n° 16 Ed. de l'IAH, 131p.